

**АМПЛИТУДА ОСТАТОЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ
НАГРУЖЕНИИ В УСЛОВИЯХ НЕОДНОРОДНОГО ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ.
СООБЩЕНИЕ 2. УСТАЛОСТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ
ИЗ СПЛАВА Д16АТ С КОНЦЕНТРАТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ
В ВИДЕ ОТВЕРСТИЯ**

В настоящее время накоплен большой объем экспериментальных исследований, описывающих закономерности изменения амплитуды остаточной (неупругой) деформации при циклическом нагружении гладких образцов (т.е. в условиях однородного напряженного состояния) из различных материалов при регулярном и программном нагружении (например, [1 - 4] и многие другие).

На их основе сформирован метод расчета долговечности конструктивных элементов с геометрическими и силовыми концентраторами напряжений по локальному напряженно-деформированному состоянию (НДС), основанный на энергетическом критерии накопления усталостного повреждения и разрушения [5 - 7].

Расчет опасной удельной энергии и повреждения, накопленного вблизи наиболее нагруженной точки конструкции, на основе этого метода проводят с использованием средних значений амплитуды остаточной деформации (т. е. без учета ее кинетики – изменения остаточной деформации в процессе эксперимента), определенных опытным путем при испытаниях гладких образцов материала до возникновения трещины.

Поэтому чрезвычайно важно количественно оценить величину изменения остаточной деформации в месте наибольшей концентрации напряжений (т.е. в условиях неоднородного напряженного состояния) с наработкой. Такие исследования нужны для понимания того, насколько неучет кинетики может послужить причиной погрешности при вычислении накопленного повреждения. Однако до сих пор этот вопрос исследован явно недостаточно.

Мало внимания уделено также сопоставлению расчетных и экспериментальных значений амплитуды остаточной деформации в условиях неоднородного напряженного состояния для многих сплавов цветных металлов. Например, автору известна только одна работа, в которой исследован этот вопрос относительно алюминиевых сплавов, применяемых в авиастроении [8]. Она посвящена концентраторам типа «выточка» и «отверстие», имеющим сравнительно высокие градиенты напряжений, типичные для авиационных силовых конструкций, но исследования проведены только при симметричном регулярном нагружении.

Особенно важной частью расчета повреждения на основе локального НДС при нерегулярном нагружении является прогнозирование величины остаточной деформации ε_{ar}^* на уровнях нагрузки, меньших, чем максимальные (перегрузочные) уровни, которые сравнительно редко встречаются в процессе эксплуатации авиационных конструкций. Такие расчеты проводят, предполагая, что амплитуды остаточных деформаций на уровнях нагрузки меньше максимального могут значительно превосходить соответствующие значения при регулярном нагружении [2, 5 и др.].

Проверка этого предположения для алюминиевых сплавов при неоднородном напряженном состоянии и нерегулярном нагружении была выполнена лишь для гладких образцов, нагруженных растяжением-сжатием и местным изгибом [9], неоднородность напряженного состояния которых весьма невелика (коэффициент концентрации напряжений $K_T=1,2\dots 1,3$).

Таким образом, для дальнейшего совершенствования методов расчета долговечности по локальному НДС применительно к прогнозированию долговечности авиационных конструкций необходимы исследования, направленные на выявление закономерностей изменения амплитуды остаточной деформации основных авиационных конструкционных материалов – алюминиевых сплавов Д16Т и В95Т – в концентраторе напряжений в процессе как регулярного, так и нерегулярного асимметричного нагружения.

Настоящая работа посвящена анализу полученных экспериментально значений остаточных деформаций, реализующихся при циклическом нагружении образцов из сплава Д16АТ, и сравнению полученных величин с расчетными значениями, определенными в соответствии с [5 - 7].

Исследования выполнены на образцах с концентратором напряжений в виде отверстия двух типоразмеров, обеспечивающих теоретические коэффициенты концентрации напряжений, равные $K_T = 3,5$ и $K_T = 4,3$ (диаметры отверстий – 16,5 и 24 мм, соответственно). Образцы (рис. 1) изготовлены из листов сплава Д16АТ двух различных партий толщиной 5 мм. Все приведенные в данной работе значения теоретических коэффициентов концентрации и номинальных напряжений определены без учета ослабления сечения отверстием, т. е. вычислены на основе сечения «брутто».

Усталостные испытания образцов проведены при регулярном и нерегулярном блочном симметричном и асимметричном мягком нагружении.

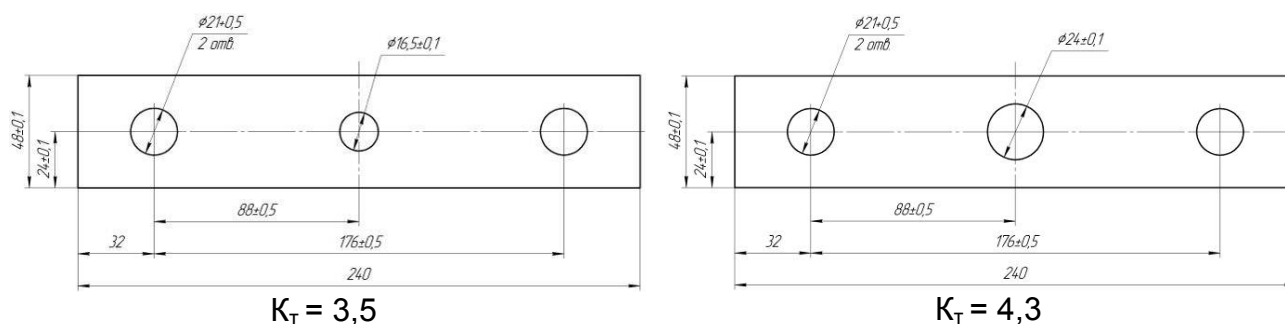


Рисунок 1 – Образцы с отверстиями, предназначенные для измерения деформаций в точке наибольшей концентрации напряжений в процессе циклического деформирования

Все эксперименты выполнены с помощью испытательного комплекса на базе электромеханических машин УММ. В комплексе использовано специально разработанное ПО, предназначенное для фильтрации и обработки экспериментальных данных в режиме реального времени [10].

Текущие значения деформаций в процессе испытаний, проведенных до возникновения усталостной трещины, измерены в месте наибольшей концентрации напряжений на поверхности отверстия с помощью специально разработанного высокоточного тензомера [11, с. 86]. Тензомер разработан совместно с н.с. А.А. Черных. Момент возникновения трещин длиной 0,5...1,8 мм позволила зафиксировать методика, разработанная совместно с инженером А.С. Колышкиным [11, с. 91], в которой использованы показания того же тензомера. Измерение полной и остаточной деформации проведено в момент равенства внешней нагрузки своему среднему значению.

Распределение амплитуд номинальных напряжений при нерегулярном нагружении в блоке – близкое к экспоненциальному. Параметры распределения соответствуют данным, приведенным в [12]. Образцы испытаны при нагрузках, соответствующих долговечности 4 - 120 блоков нагружения и $7 \cdot 10^3$ - $2 \cdot 10^6$ циклов до разрушения.

Описанные испытания образцов с отверстием преследовали ряд целей:

- исследование величин и характера изменения с наработкой амплитуд остаточных деформаций ε_{ar}^K (кинетики) в месте наибольшей концентрации напряжений в зависимости от значений прикладываемой нагрузки;

- исследование изменения средних значений полной деформации в каждом цикле нагружения с наработкой в месте наибольшей концентрации напряжений;

– сопоставление экспериментальных значений средних амплитуд остаточной деформации ε_{ar}^* в гладком материале и на поверхности концентратора напряжений $\varepsilon_{ar}^{K^*}$;

– изучение влияния максимальных уровней нагружения на величину амплитуды остаточной деформации в концентраторе при меньших нагрузках в случаях нерегулярного блочного нагружения;

– сопоставление экспериментальных и расчетных значений величин остаточных деформаций в образцах с различным K_T .

Изменение амплитуды остаточной деформации ε_{ar}^K с наработкой (кинетика) показано на рис. 2, 3, где σ_{mH} – средние номинальные напряжения цикла нагружения; σ_{aH}^{max} – амплитуда номинальных напряжений, соответствующая наибольшей ступени в блоке нагрузок.

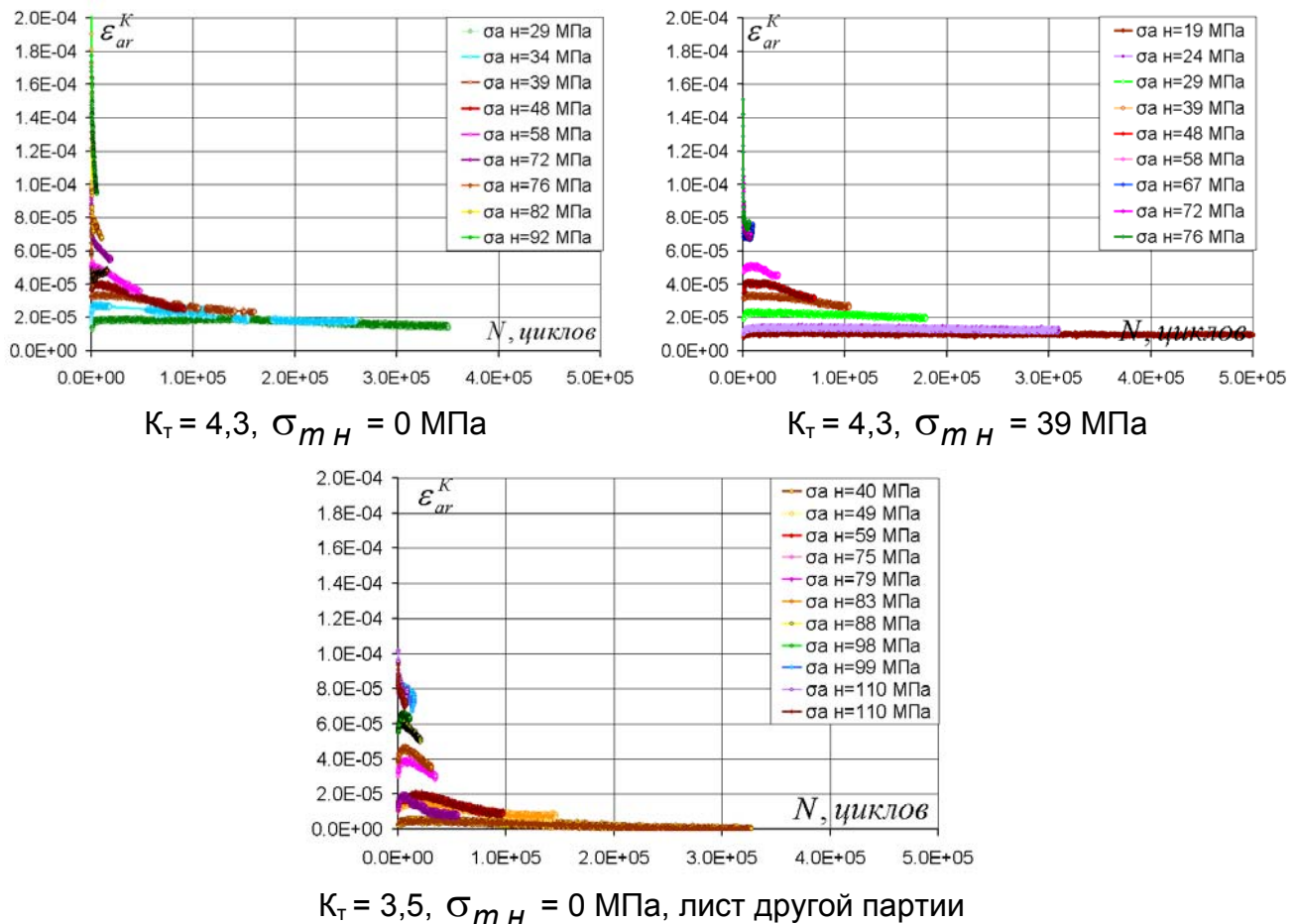
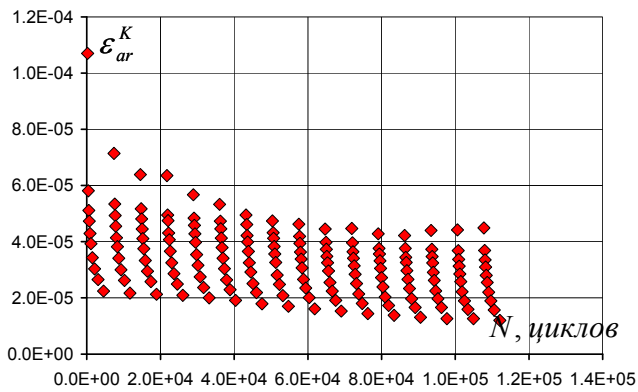
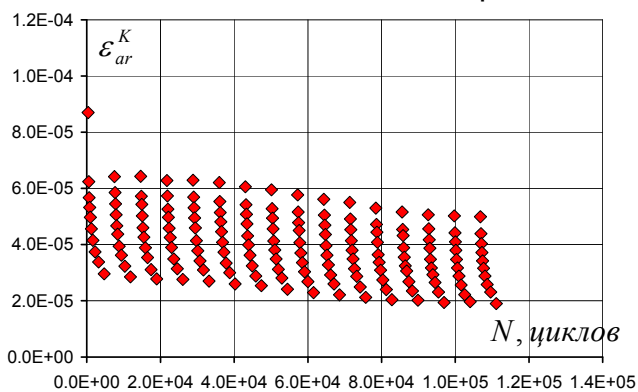


Рисунок 2 – Изменение амплитуды остаточной деформации ε_{ar}^K с наработкой при регулярном нагружении



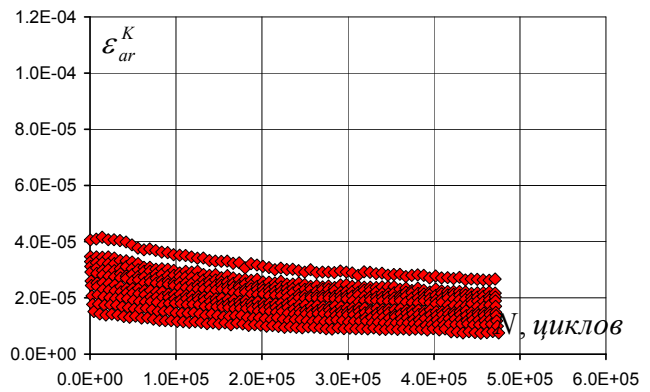
$$\sigma_{aH}^{max} = 77 \text{ МПа}, \sigma_{mH} = 0 \text{ МПа}$$

16 блоков до возникновения трещины



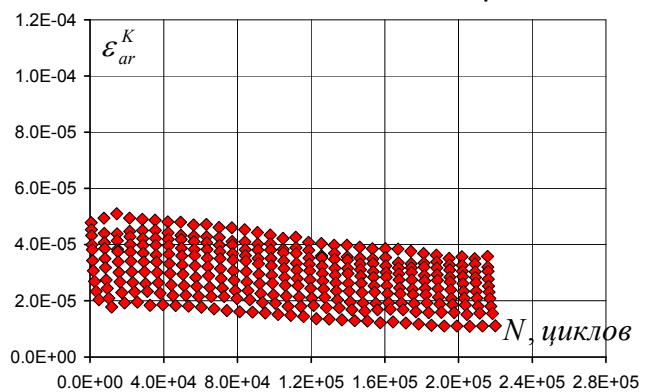
$$\sigma_{aH}^{max} = 68 \text{ МПа}, \sigma_{mH} = 39 \text{ МПа}$$

20 блоков до возникновения трещины



$$\sigma_{aH}^{max} = 58 \text{ МПа}, \sigma_{mH} = 0 \text{ МПа}$$

89 блоков до возникновения трещины



$$\sigma_{aH}^{max} = 58 \text{ МПа}, \sigma_{mH} = 39 \text{ МПа}$$

33 блока до возникновения трещины

Рисунок 3 – Изменение амплитуды остаточной деформации ε_{ar}^K с наработкой при нерегулярном блочном нагружении, $K_T = 4,3$

По результатам испытаний проведена оценка величины изменения амплитуды остаточной деформации в процессе циклического нагружения. Определены зависимости отношения наибольшего отклонения амплитуды остаточной деформации ε_{ar}^K , измеренного в ходе одного эксперимента, от своего среднего значения к этому среднему значению ε_{ar}^{K*} от уровня локальных упругих напряжений в месте наибольшей концентрации напряжений на поверхности отверстия. При нерегулярном нагружении рассмотрено изменение амплитуды остаточной деформации на максимальных ступенях в блоках нагрузок ε_{ar}^K в зависимости от числа блоков до возникновения трещины, так как на остальных ступенях это изменение существенно слабее. Полученные зависимости показаны на рис. 4.

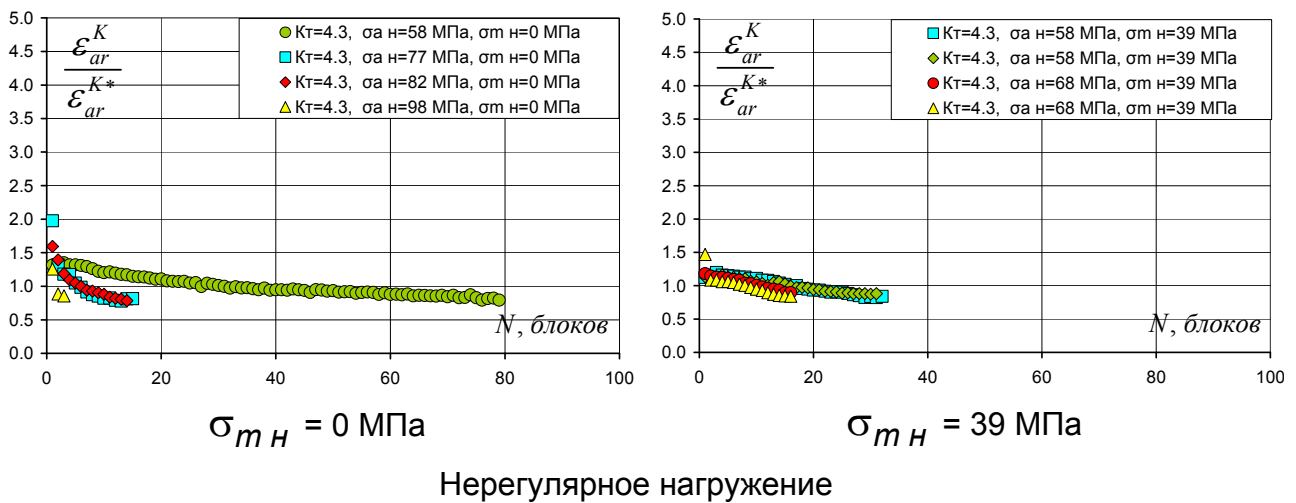
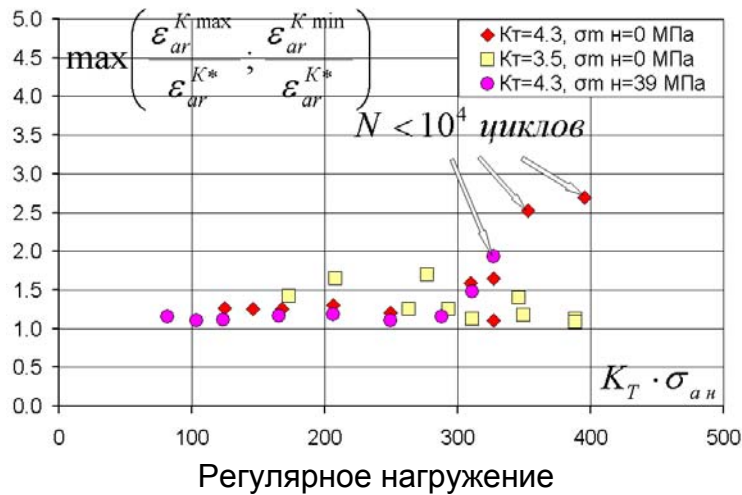


Рисунок 4 – Максимальное изменение амплитуды остаточной деформации в ходе одного эксперимента

Установлено, что амплитуда остаточной деформации в концентрате напряжений ε_{ar}^K изменяется значительно менее интенсивно, чем в условиях однородного поля напряжений, где это изменение может достигать трех и более раз. Так, для регулярного нагружения в области многоциклового усталости (более 10^4 циклов до возникновения трещины) максимальное отличие текущих значений остаточной деформации ε_{ar}^K (за один эксперимент) от своего среднего значения $\varepsilon_{ar}^{K^*}$ в большинстве случаев не превышало двух раз и в среднем составило 1,3 раза. Для нерегулярного блочного нагружения это отличие также не превышало двух раз и в среднем составило 1,6 раза для симметричного и 1,4 раза для асимметричного цикла нагружения.

Для дополнительного подтверждения критерия усталостного разрушения, используемого в методе расчета по локальному НДС, проведено сопоставление кривых усталости материала, полученных по

результатам испытания гладких образцов, и кривых усталости образцов с отверстием.

Для исключения влияния принятых в методе гипотез и допущений кривые усталости приведены в координатах Коффина – Мэнсона: «средняя амплитуда остаточной деформации – число циклов до возникновения макротрещины», а не в координатах «опасная энергия – долговечность», т. е. на основе исключительно экспериментальных данных (рис. 5).

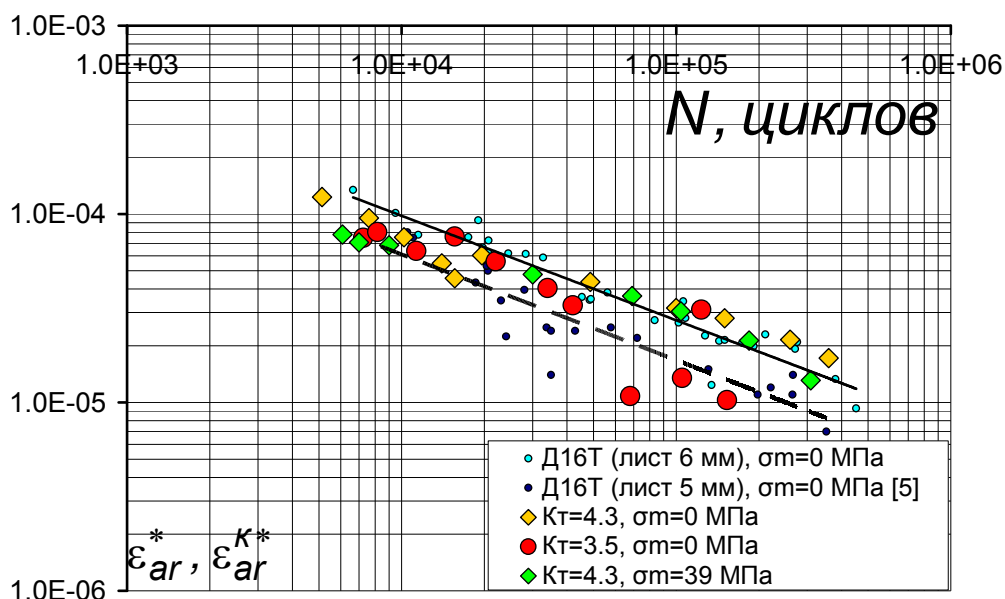


Рисунок 5 – Кривые усталости материала и образцов с отверстиями в координатах Коффина – Мэнсона

В результате установлено, что зависимости $\lg(\epsilon_{ar}^*) - \lg(N)$ для образцов с отверстиями из листов толщиной 5 мм различных партий и разными K_T и гладких образцов из листов толщиной 5, 6 мм лежат в одной совокупности в диапазоне долговечностей $6 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^4$ циклов. При больших значениях долговечности зависимости несколько различаются, так что кривая для образцов с $K_T = 4,3$ лежит по правому краю полосы разброса значений для гладких образцов, а образцы с $K_T = 3,5$ – по левому. Такое отличие вполне сопоставимо с разбросами, вызванными влиянием различных партий сплава Д16Т.

Таким образом, расчет повреждения, накопленного в концентраторе напряжений, с использованием опасной удельной энергии, вычисленной на основе средней амплитуды остаточной деформации материала, обеспечит точность прогноза долговечности, сопоставимую с разбросами усталостных свойств материала от партии к партии.

Проведена оценка максимального изменения среднего значения полной деформации $\Delta \varepsilon_m$ в течение каждого эксперимента. В результате установлено, что как при симметричном, так и асимметричном регулярном нагружении максимальное изменение средней деформации $\Delta \varepsilon_m$ в концентраторе напряжений за все время «жизни» образца не превышало $3 \cdot 10^{-4}$, т.е. меньше амплитуды полной деформации более чем на порядок. Такая величина средней деформации сопоставима с аппаратным «дрейфом» средних значений деформации в используемом измерительном комплексе. Изменение средней деформации, осредненной по всем экспериментам, составляет менее $2 \cdot 10^{-4}$, т. е. сопоставима с величинами амплитуды остаточной деформации, и может не учитываться при расчетах накопленного повреждения и долговечности.

Дальнейшее совершенствование метода расчета по локальному НДС крайне затруднено без всестороннего анализа точности прогнозируемой величины амплитуды остаточной деформации. Поэтому проведено сравнение амплитуд остаточной деформации ε_{ar}^{K*} , определенных в соответствии с методом расчета по локальному НДС [5-7] и полученных опытным путем при регулярном и нерегулярном блочном нагружении (рис. 6, 7). На рис. 7 показаны два способа вычисления остаточной деформации – с учетом влияния максимальных уровней нагрузки на последующие [5] и без этого учета.

При нерегулярном нагружении полностью подтвержден эффект влияния максимальных ступеней на ступени с меньшей нагрузкой (увеличение ε_{ar}^{K*} по сравнению с регулярным нагружением) и в случае неоднородного напряженного состояния. Это происходит, если число блоков до возникновения трещины превышает 10, как это и указывалось в работах на основе испытаний гладкого материала [2, 5, 4].

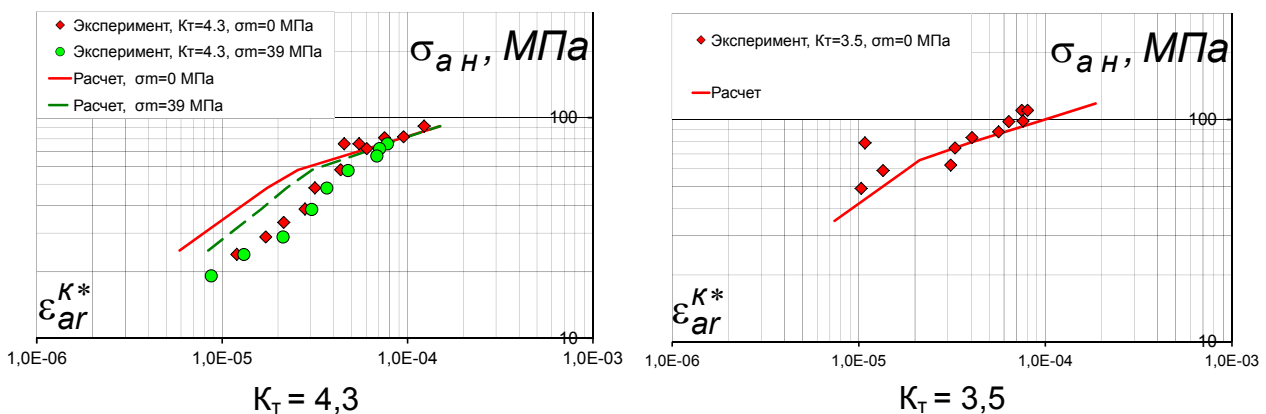
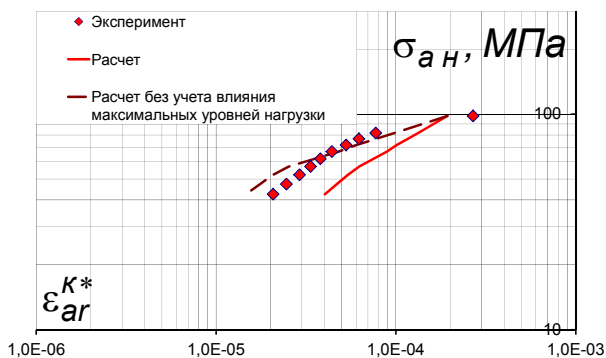
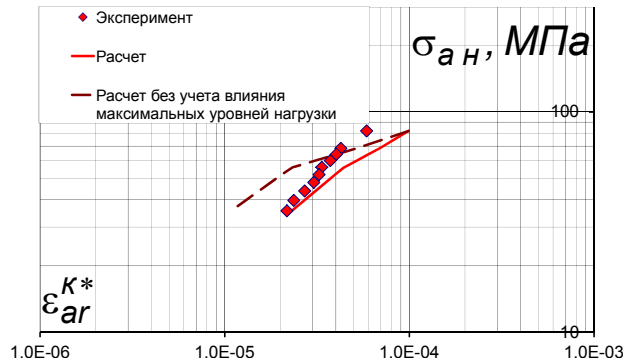


Рисунок 6 – Диаграммы циклического деформирования при регулярном нагружении



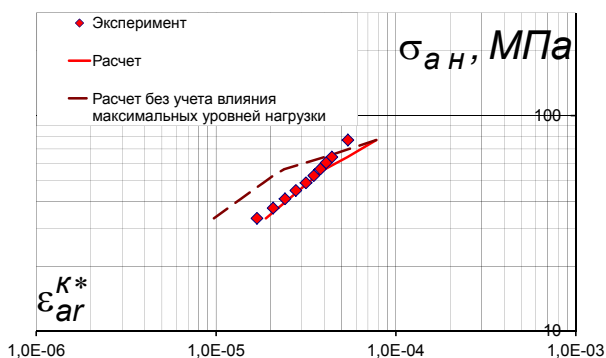
$$\sigma_{aH}^{max} = 98 \text{ МПа}, \sigma_{mH} = 0 \text{ МПа}$$

3 блока до возникновения трещины



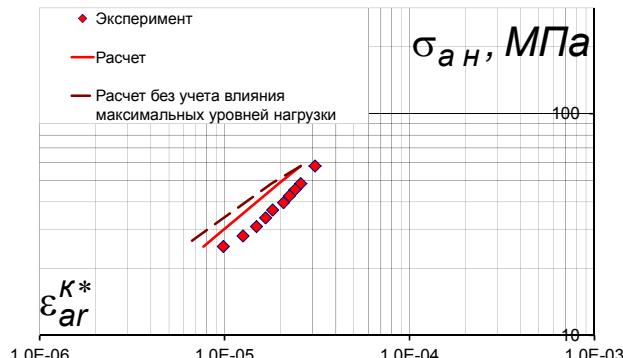
$$\sigma_{aH}^{max} = 82 \text{ МПа}, \sigma_{mH} = 0 \text{ МПа}$$

16 блоков до возникновения трещины



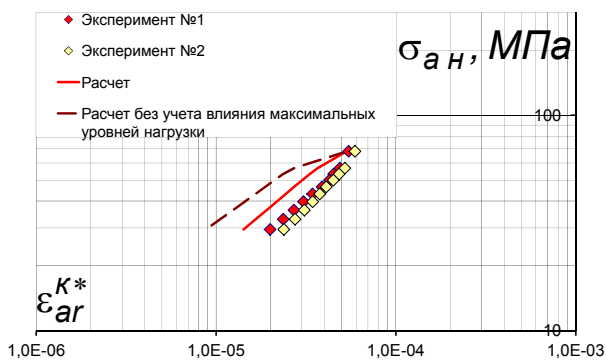
$$\sigma_{aH}^{max} = 77 \text{ МПа}, \sigma_{mH} = 0 \text{ МПа}$$

16 блоков до возникновения трещины



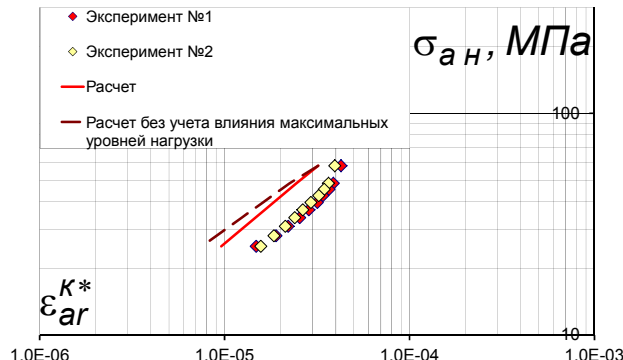
$$\sigma_{aH}^{max} = 58 \text{ МПа}, \sigma_{mH} = 0 \text{ МПа}$$

89 блоков до возникновения трещины



$$\sigma_{aH}^{max} = 68 \text{ МПа}, \sigma_{mH} = 39 \text{ МПа}$$

20 блоков до возникновения трещины



$$\sigma_{aH}^{max} = 58 \text{ МПа}, \sigma_{mH} = 39 \text{ МПа}$$

32 блока до возникновения трещины

Рисунок 7 – Диаграммы циклического деформирования при нерегулярном нагружении

Установлено, что отличие расчетных и экспериментальных значений остаточных деформаций сопоставимо с отличиями различных партий сплава и составляет около двух раз. По всей же совокупности испытаний среднее отличие расчетных и экспериментальных значений (с учетом влияния максимальных уровней нагрузки на последующие) – около 1,5 раза.

Оценка точности прогнозирования накопленного повреждения проведена путем сравнения расчетных и экспериментальных значений долговечности при регулярном и нерегулярном нагружениях.

Установлено, что расчетные и теоретические значения долговечности достаточно хорошо согласуются между собой во всем диапазоне испытаний (расчетные значения, как правило, лежат в полосе разброса экспериментальных данных). Максимальное отличие не превышает трех раз, а среднее составляет 1,7 раза. Важно подчеркнуть, что в случаях, когда расчет по локальному НДС не лежит в полосе разброса опытных данных, он обеспечивает консервативную оценку долговечности, обеспечивая расчет в разумный запас.

Выводы

Установлено, что для материала Д16Т кинетика амплитуды остаточной деформации ε_{ar}^K , измеренной на поверхности отверстия в месте наибольшей концентрации напряжений, существенно меньше, чем при однородном напряженном состоянии, и отличие экстремального значения остаточной деформации от среднего составляет в среднем менее двух раз. Это позволяет без существенной погрешности использовать средние значения амплитуды остаточной деформации материала ε_{ar}^* для вычисления остаточной деформации в концентраторе напряжений ε_{ar}^{K*} при расчете долговечности по локальному НДС.

Кривые выносливости, построенные по средним значениям амплитуды остаточной деформации (Коффина – Менсона), измеренным в концентраторе напряжений и на гладких образцах, лежат в пределах различий, вызванных разбросами свойств разных партий сплава Д16Т.

Подтверждено, что после действия редких больших уровней нагрузки (перегрузки) в условиях нерегулярного нагружения и неоднородного напряженного состояния амплитуды остаточных деформаций на ступенях превосходят соответствующие значения при регулярном нагружении.

Список использованных источников

1. Циклические деформации и усталость металлов: в 2 т. [Текст] / В.Т. Трощенко, Л.А. Хамаза, В.В. Покровский и др.; под. ред. В.Т. Трощенко. – К.: Наук. думка, 1985. – Т.1: Малоцикловая и многоцикловая усталость. – 214 с.

2. Фомичев, П.А. Изменение амплитуды пластической деформации при регулярном и программном мягком нагружении сталей

[Текст] / П.А. Фомичев, И.Ю. Трубочанин // Проблемы прочности. – Вып. 2. – 1991. – С. 39-44.

3. Гребенюк, Я.В. Исследование деформирования конструкционных сталей при циклическом нагружении [Текст] / Я.В. Гребенюк // Авиационно-космическая техника и технология: тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2001. – С. 343 – 346.

4. Третьяков, А.С. Циклические деформационные и усталостные характеристики сплава Д16АТ при программном нагружении. Сообщение 2. Амплитуда остаточной деформации [Текст] / А.С. Третьяков, А.А. Черных // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 1 (69). – Х., 2012. – С. 47 – 60.

5. Фомичев, П.А. Методы прогнозирования долговечности элементов конструкций при нерегулярном нагружении, основанные на энергетическом критерии разрушения: дис. ... д-ра. техн. наук: 01.02.04; защищена 1992 / Фомичев Петр Александрович. – Х., 1992. – 456 с.

6. Фомичев, П.А. Прогнозирование долговечности по локальному напряженно-деформированному состоянию. Сообщение 1. Определение напряжений и деформаций в надрезе при циклическом упругопластическом деформировании [Текст] / П.А. Фомичев, В.В. Звягинцев // Проблемы прочности. – 2000. – № 3. – С. 37 – 45.

7. Фомичев, П.А. Прогнозирование долговечности тел с надрезами по локальному напряженно-деформированному состоянию. Сообщение 2. Определение параметра, характеризующего долговечность тел с концентраторами напряжений [Текст] / П.А. Фомичев // Проблемы прочности. – 2000. – № 3. – С. 46 – 55.

8. Звягинцев, В.В. Экспериментальное исследование долговечности и циклической остаточной деформации в зоне концентрации напряжений [Текст] / В.В. Звягинцев, П.А. Фомичев // Прочность конструкций летательных аппаратов. – Вып. 9. – Х., 1990. – С. 49 – 58.

9. Третьяков, А.С. Амплитуда остаточной деформации при циклическом нагружении в условиях неоднородного поля напряжений. Сообщение 1. Усталостные испытания образцов из сплава Д16АТ растяжением-сжатием и местным изгибом [Текст] / А.С. Третьяков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3 (71). – Х., 2012. – С. 97 – 109.

10. Фомичев, П.А. Методика экспериментальных исследований циклических деформационных и усталостных характеристик конструкционных материалов [Текст] / П.А. Фомичев, А.С. Третьяков, А.А. Черных // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та. – Вып. 2 (53). – Х., 2008. – С. 24-34.

11. Теоретические основы расчетов долговечности авиационных конструкций при случайном нагружении: Отчет о НИР / ХАИ; рук. Фомичев П.А.; исполн. Фомичев П.А., Гребенюк Я.В., Трубочанин И.Ю., Пинчук Д.А., Тышецкий О.И., Бойко Т.С., Кучерявый Е.Ф., Третьяков А.С., Вакуленко С.В., Заруцкий А.В., Решетникова Р.Ю., Черных А.А., Колышкин А.С., Мандзюк С.Ф. – Х., 2009. – 335 с. – Инв. № 02900038207.

12. Черных, А.А. Циклические деформационные и усталостные характеристики сплава Д16АТ при программном нагружении. Сообщение 1. Накопленное повреждение при симметричном нагружении по трем законам распределения амплитуды напряжений [Текст] / А.А. Черных, А.С. Третьяков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 4 (60). – Х., 2009. – С. 64 – 76.

Поступила в редакцию 27.11.2014.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. П.А. Фомичев,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*